

ESTABILIZACIÓN DE UNA MEZCLA A BASE DE TIERRA POR MEDIO DE TRATAMIENTO TÉRMICO

Araí S. Rieppi Godoy¹, Lucas E. Peisino², Rosana Gaggino³, Guillermo Rolón⁴, Bárbara Belén Raggiotti⁵

Centro experimental de la vivienda económica, ¹arairieppigodoy@gmail.com; ²lpeisino@ceve.org.ar; ³rgaggino@ceve.org.ar

⁴Instituto de investigaciones territoriales y tecnológicas para la producción del hábitat, guillerolon02@gmail.com

⁵Centro de Investigación, Desarrollo y Transferencia de Materiales y Calidad, belenraggiotti@gmail.com

Palabras clave: revestimientos de tierra, revoque estabilizado, ceramizado, adherencia

Resumen

Los revoques y muros exteriores de tierra sufren una acelerada degradación por las inclemencias medio ambientales (lluvia, viento, y biodeterioro, entre otras). Actualmente, hay un avance en el perfeccionamiento de las propiedades mecánicas, estabilización y durabilidad de estos revoques a través de la incorporación de aditivos como cemento, cal, etc. (estabilización química) y/o corrección granulométrica, agregado de fibras (estabilización mecánica), en muchos casos con un alto consumo energético e impacto ambiental. El objetivo principal de este trabajo es desarrollar un nuevo procedimiento para realizar revestimientos compatibles con la arquitectura de tierra. En este sentido se llevó a cabo la transformación química superficial de un revoque de tierra, mediante un tratamiento térmico de bajo consumo energético como estrategia para incrementar su durabilidad. Se realizaron revoques de 6 mm de espesor sobre adobes con distintas formulaciones, variando los materiales y las dosificaciones. Se empleó tierra, arcilla comercial, arena, ceniza, bórax y esmalte alcalino. Luego de 30 días de secado, se realizó un tratamiento térmico superficial utilizando una resistencia eléctrica, variando los tiempos de exposición (5 y 10 minutos), también se dejó una probeta de cada formulación sin tratamiento térmico como material de referencia. Finalmente se realizaron ensayos de erosión por goteo y abrasión. Los revoques calentados 10 minutos sufrieron un desprendimiento desde la superficie del sustrato (adobe). Las mezclas que poseen alta proporción de tierra tienen una mejor resistencia a la erosión a mayor tiempo de tratamiento térmico. El ensayo de abrasión reveló resultados diferentes, ya que todas las mezclas sin tratamiento se comportaron mejor frente al desgaste, notando un leve decrecimiento de la resistencia con el aumento de tiempo de exposición a la fuente de calor.

1 INTRODUCCIÓN

La tierra, junto con la madera y la piedra, abundantes y accesibles, han sido materiales de construcción naturales empleados desde el afincamiento de las primeras civilizaciones, adaptando el desarrollo de las tecnologías en cada contexto cultural y ambiental desde entonces. La arquitectura con tierra es uno de los productos culturales y tecnológicos más antiguos de la civilización con la que se construyeron desde pequeños caseríos hasta grandes núcleos urbanos y también edificios representativos y monumentos religiosos en casi todas partes del mundo. La actual crisis ambiental está movilizandoprogresivamente a la sociedad a demandar edificaciones más económicas, de menor impacto ambiental y energéticamente eficientes, dando mayor valor a aspectos tales como la salud y el confort climático de sus casas. Estos requerimientos de hábitat han generado un cambio de visión despertando un interés en materiales y técnicas de construcción locales favorables a la autoconstrucción. Se ha comprendido que la tierra como material natural tiene mejor rendimiento en tal sentido que los materiales convencionales como el hormigón, los ladrillos cerámicos, los perfiles y laminados metálicos, entre otros, y un gran potencial, no solo para favorecer la autoconstrucción sino también para la construcción industrializada a partir de ella (Minke, 2005).

En estos momentos, los grupos de investigación interesados en introducir a la tierra en un proceso de mayor industrialización y dentro del marco legal de las normas de construcción

se encuentran en aumento estableciendo nuevas agendas de investigación en esta dirección. Muchos de los desarrollos consideran el mejoramiento y adaptación de las técnicas ancestrales en la medida que favorecen el desarrollo económico y ecológico local. Entre las líneas de avances y mejoras se encuentra el desarrollo de materiales compatibles para la protección y el avance de la apariencia exterior de las construcciones con tierra. El estudio de los revestimientos exteriores es fundamental para avanzar en la respuesta a estos requerimientos.

Es conocido que los revoques exteriores de tierra sufren una acelerada degradación debido a las inclemencias medioambientales (lluvia, viento, granizo, biodeterioro, etc.) pero resultan, al mismo tiempo, entre los más adecuados para ser aplicados sobre muros y techos construidos con este mismo material. Por esta razón, a lo largo de la historia, se han desarrollado diversas estrategias para mejorar su durabilidad. Algunas de estas estrategias consisten en la estabilización química (mediante la incorporación de aditivos como por ejemplo cemento, cal, emulsiones poliméricas, etc.) y/o mecánica (corrección granulométrica y agregado de fibras, entre otras), que modifican sus características originales y aumentan en cierto porcentaje la resistencia del material obtenido. Otras estrategias recurren a la protección adicional del revoque mediante el control de las condiciones de exposición a los agentes ambientales como el empleo de aleros, elevación de sobrecimientos, pinturas y recubrimientos superficiales, etc. Pero hasta el momento es escasa la experiencia por vía de la transformación química del material, donde el tratamiento térmico (habitual para la elaboración de cerámicos) es una posibilidad. La novedad de este trabajo, es que se propone realizar un tratamiento térmico *in-situ*, sobre la capa de revoque de tierra; a diferencia de la fabricación de bloques cerámicos, los cuales reciben el tratamiento térmico en fábrica.

En el objetivo de este trabajo se plantea un procedimiento para obtener revestimientos que sean compatibles con la arquitectura de tierra mediante la transformación termoquímica, desarrollando un proceso de estabilizado. En este sentido, se propone llevar a cabo la modificación superficial de un revoque de tierra e arcilla, mediante un tratamiento térmico como estrategia para incrementar su durabilidad frente a la acción de distintos agentes ambientales.

En este trabajo, se reportan diversas dosificaciones de mezclas de tierra para la fabricación de un revoque ceramizable donde este tratamiento ocurre *in situ* sobre el revoque ya ejecutado. También se presentan las propiedades mecánicas de los recubrimientos ceramizados.

1.1 Marco teórico

El enfoque de hábitat sostenible constituye un área de conocimiento orientada, entre diversos aspectos, al uso eficiente de recursos y reducción del impacto ambiental en el diseño, construcción y mantenimiento edilicio. En ese marco, la construcción con tierra es una de las tecnologías que se ubica dentro de la línea de sostenibilidad ambiental, revalorizada a escala global en las últimas décadas, por presentar ventajas ambientales de confort térmico y economía de recursos frente a otros sistemas constructivos, entre otras cuestiones (Rotondaro; Mandrini, 2018; Minke, 2006). Uno de los principales desafíos que presenta actualmente este tipo de construcción, es el desarrollo de revoques exteriores durables, económicos y compatibles con las diferentes técnicas de construcción con tierra. A lo largo de la historia, se han desarrollado innumerables formulaciones para la estabilización de los revoques exteriores de tierra, centradas principalmente en la incorporación de aditivos que le otorgan al material las características necesarias para soportar las condiciones ambientales. Dentro de los estabilizantes más investigados se encuentran la cal y el cemento, los cuales se utilizan juntos o por separado en proporciones de no más del 10 % (Pinto et al., 2017; Santos et al., 2017). Otros aditivos minerales que otorgan a la tierra una mayor resistencia contra el agua son el bitumen y los silicatos de sodio y potasio (Minke, 2006). También, para este fin, es posible utilizar productos de origen animal o vegetal, como por ejemplo los mucílagos de cactus (*Opuntia* spp.). Recientemente, se ha difundido la

utilización de emulsiones acrílicas y superplastificantes como aditivos que mejoran la resistencia a la erosión hídrica de los revoques de tierra (Kebao; Kagi, 2012). A su vez, se ha reportado el empleo de otras sustancias procedentes de la industria química, como el silicato de etilo (Castilla, 2011). De este modo, las mezclas de tierra para revoques exteriores que mejor comportamiento poseen frente a las condiciones climáticas extremas son las elaboradas con aditivos industrializados. Sin embargo, la producción y el transporte de éstos generan un gran impacto ambiental y va en contra de los criterios de la construcción de un hábitat sostenible. Desde la antigüedad es conocida la posibilidad de transformar de manera irreversible objetos de tierra a través de un tratamiento térmico, para convertirlos en cerámicos. Los ladrillos cocidos y las tejas cerámicas son un ejemplo de ello, estos no poseen una apariencia visual muy diferente a los productos de tierra; sin embargo, su resistencia mecánica es mucho mayor y la propiedad más distintiva respecto a los materiales de tierra es la resistencia a la erosión hídrica (Boch; Nièpce, 2007). Este proceso de transformación de la tierra en cerámica a altas temperaturas por acción del calor es denominado ceramización (Zuleta Roa, 2012). Así mismo, desde un punto de vista microscópico, la transformación de tierra en cerámica se puede describir como un proceso de sinterización (figura 1). Dicho proceso consiste en la consolidación de un aglomerado en polvo (un material granular poco cohesivo) por efecto de la temperatura, donde parte de las partículas del polvo de partida (tierra en este caso) se unen o sueldan entre sí, para crear un sólido cohesivo generalmente policristalino (cerámica). Como se puede observar en el esquema de la figura 1, en el proceso de sinterizado puede ocurrir solo el crecimiento de los granos, sin la densificación del material; o puede ocurrir con densificación del material y una reducción de la porosidad, que implica contracción. En este punto es importante mencionar que los materiales de construcción cerámicos como los ladrillos cocidos presentan una muy alta energía incorporada debido al proceso de ceramización, frente a los materiales sin tratamiento térmico, tales como los adobes o revoques de tierra. Por tal razón, considerar las propiedades de la ceramización solo para un reducido espesor del revoque implica maximizar las posibilidades que brindan ambos estados de la materia haciendo un uso racional de la energía empleada.

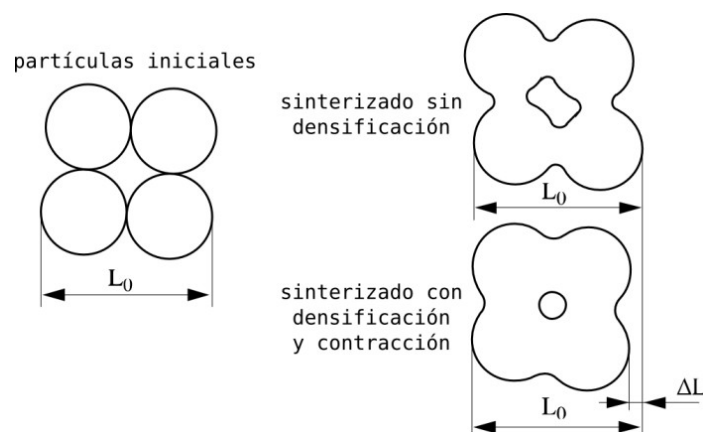


Figura 1. Sinterizado de cuatro partículas de un polvo. En el sinterizado puede ocurrir solo el crecimiento de los granos sin densificación del material; o puede ocurrir con densificación del material y una reducción de la porosidad, que implica contracción, $L_{\text{final}} = L_0 - \Delta L$; (Boch; Nièpce, 2007)

1.2 Antecedentes

En el año 1999, fue construida la “Casa Terracota”, ubicada en Villa de Leyva, en el departamento de Boyaca, Colombia (Zuleta Roa, 2012; Martín Díaz, 2016). Esta casa es básicamente una pieza de cerámica monolítica, de 500 m² que aprovecha los recursos del sector en el que se localiza. Está hecha únicamente con dos materiales: arcilla y agua, extraídos artesanalmente del mismo suelo donde se emplaza la obra. Se realizó en capas, cuando se terminaba de armar la habitación, se dejaba secar a la intemperie con las condiciones climáticas de temperatura ambiente entre 10°C y 22°C y humedad relativa del 80%. Claramente para este proceso el sol y el viento jugaron un papel fundamental.

Finalmente se construía un horno sobre esa pared y se encendía durante 30 días utilizando carbón coque y se dejaba enfriar otros 30 días, como se muestra en la figura 2. Este es solo un ejemplo a modo de ilustrar que resulta posible llevar a cabo una ceramización *in situ*, sin embargo, el gasto energético y la contaminación producida por la quema de combustible fósil involucrado en el proceso de ceramización de la “Casa Terracota” es incalculable y va en contra de todos los lineamientos de la producción arquitectura en el marco de un hábitat sostenible.



Figura 2. Proceso de cocción *in situ* de la casa terracota (Baraya 2019)

2 METODOLOGÍA

2.1 Materiales

Las mezclas realizadas para los revoques tienen como componente principal la tierra. Además, se incluyen otros materiales como agregados (arena fina normalizada), arcillas comerciales que son utilizadas a modo de aditivo (caolín y bentonita) y otras sustancias empleadas como fundentes (cenizas, bórax y esmalte alcalino). Se procedió a realizar una clasificación del suelo empleando para ello el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) según la norma ASTM D2487 (2017). El suelo utilizado para realizar las muestras fue sacado de una cantera en la provincia de Córdoba. Se realizaron los ensayos VN-E1-65- VN-E2-65- VN-E3-65, de la Norma de Ensayos de Vialidad Nacional Argentina (Dirección Nacional de Vialidad, 2001), los cuales corresponden a: tamizado de suelos por vía húmeda, límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, respectivamente. Además, se llevó a cabo la determinación granulométrica del suelo empleando el método del hidrómetro de la norma ASTM D7928 (2017), cuya composición arrojó los siguientes valores: 20% arcilla, 48% limo y 32% arena. En función de esta distribución, la clasificación indicó que el suelo corresponde a un limo de baja plasticidad arenoso (ML). Se empleó una arena fina normalizada como agregado. El caolín, la bentonita, la arcilla de alfarería y el cristal alcalino fueron adquiridos comercialmente en una tienda de productos de alfarería. El bórax fue adquirido comercialmente y es de grado técnico.

2.2 Elaboración de probetas

2.2.1 Sustrato base o soporte

Para aumentar la superficie de contacto entre el revoque de tierra y la superficie donde se aplica, esta debe ser suficientemente rugosa con el objetivo de obtener una buena adherencia (Minke, 2005). Los revoques se aplicaron sobre adobes de 24x12x5 cm. Previamente a la colocación del revoque se trató el sustrato siguiendo dos pasos que se mencionan a continuación:

Paso 1: se limpia la superficie del adobe con un pincel seco de cerdas duras para eliminar partículas de polvo sueltas o acumulación de sales, generando un contacto continuo entre las dos capas;

Paso 2: se humecta la superficie a trabajar para evitar la absorción excesiva del agua del revoque, sumergiendo el adobe en agua limpia por unos segundos.

2.2.2 Revoque

En la tabla 1 se muestran las composiciones de las mezclas realizadas para los revoques en porcentaje en volumen (%v/v) de los diferentes componentes. La cantidad de agua para lograr un estado plástico (buena trabajabilidad y plasticidad) de las mezclas se evaluó al momento de su preparación con el fin de lograr una adecuada ejecución del mismo.

Las mezclas se prepararon de la siguiente manera: primero se hidrataron los finos, es decir, se colocó la proporción de tierra más el aditivo con agua, durante siete días. Luego se agregó la arena y se ajustó el agua de amasado para lograr el estado plástico. El mezclado de los materiales se realizó manualmente durante el tiempo necesario para lograr una mezcla homogénea, utilizando cuchara de metal de albañilería y un recipiente de plástico. Inmediatamente, se procedió a la aplicación del revoque, de forma tal de asegurar un buen anclaje mecánico, y evitar el formado de burbujas de aire, creando así un buen contacto entre sustrato y revoque. Para ello, se lanzó mezcla de revoque sobre el adobe con la cuchara de albañil; se cortó o niveló con la ayuda de una regla para eliminar material en exceso, generando una presión continua y movimientos horizontales para conseguir un espesor parejo en toda superficie a cubrir. A medida que el revoque colocado fue perdiendo humedad, se eliminaron las irregularidades superficiales con un fieltro, esto se realizó humedeciendo el elemento levemente y trabajando con movimientos circulares sobre el revoque sin ejercer demasiada presión impidiendo posibles desplazamientos.

Los revoques se aplicaron en la parte central del adobe con una superficie de 12x12 cm para facilitar el proceso de ceramizado. Una imagen de la probeta se muestra en la figura 3.

El secado se realizó en dos etapas: aireación y secado controlado. En la primera se dejaron las probetas un día en laboratorio, sin ninguna condición específica de humedad y temperatura. En la etapa final se dejaron las probetas dentro de un recipiente tapado durante 30 días, el objetivo principal de esta es controlar la evaporación del agua de amasado creando una capa libre de fisuras o micro fisuras.



Figura 3. Disposición del revoque sobre el adobe: probeta seca (crédito: A. Rieppi)

Tabla 1. Composición en porcentaje en volumen de mezclas de revoques elaboradas

Mezclas	Base (%v/v)		Aditivos (%v/v)
M1	Tierra (50)	Arena (50)	
M2	Tierra (25)	Arena (50)	Caolín (25)
M3	Tierra (25)	Arena (50)	Bentonita (25)
M4	Tierra (25)	Arena (50)	Arcilla ^a (25)
M5	Arcilla ^a (50)	Arena (50)	-
M6	Arcilla ^a (45)	Arena (50)	Ceniza (5)
M7	Arcilla ^a (45)	Arena (50)	Bórax (5)
M8	Arcilla ^a (49)	Arena (50)	Esmalte alcalino (1)

^a Arcilla comercial para alfarería

2.2.3 Ceramización

Finalmente, la ceramización se llevó a cabo utilizando una resistencia eléctrica calefactora circular (800 Watt) colocada en contacto con la superficie del revoque, de esta manera se logró ceramizar el revoque *in situ*. Se apoyó el revoque sobre las resistencias verificando que éstas ocupen todo el ancho del revoque como se muestra en la imagen de la figura 4. Una vez ubicada la probeta, se encendió la resistencia eléctrica al máximo de su potencia durante el tiempo previsto, se apagó y se dejó enfriar sobre el mismo.



Figura 4. Proceso de ceramización: disposición de la probeta sobre el calentador circular de resistencias eléctricas (crédito: A. Rieppi)

Los parámetros fundamentales en esta etapa son: velocidad de calentamiento, temperatura de trabajo, tiempo de calentamiento y tiempo de enfriamiento. Es muy importante tener en cuenta que se busca realizar este tratamiento a una película superficial muy delgada del revoque, esto significa que los tiempos de exposición son reducidos. En esta etapa del trabajo se fijaron dos tiempos de exposición: 5 y 10 minutos. Ciertos valores de los parámetros anteriores se listan en la tabla 2.

Tabla 2. Parámetros para la ceramización de los revoques

Condición	Velocidad de calentamiento (°C/minutos)	T final (°C)	t calentamiento (minutos)	t enfriamiento (minutos)
#1	---	---	---	---
#2	100	500	5	60
#3	100	700	10	60

2.3 Propiedades físicas de los revocos

Los revocos realizados se sometieron a ensayos para obtener el índice de erosionabilidad hídrica y el índice de abrasión. Alcanzado el secado total y los correspondientes procesos de coronizado, los especímenes se sometieron a ambos ensayos. A continuación, se detallan los procedimientos.

2.3.1 Índice de erosionabilidad

Este índice se obtiene mediante el ensayo de erosión por goteo bajo la norma NZS 4298 (1998). Consiste en colocar una tira de paño tipo ballerina de 16 mm de ancho dentro de un recipiente con 100 mL de agua, respetando las distancias establecidas en la norma. El agua subirá por capilaridad y saldrá en forma de gota en un tiempo de 20 a 60 minutos (figura 5).

Terminado el ensayo, se mide la profundidad del hoyo (D) en milímetros. Para $0 < D < 5$, el índice de erosión es 2; para $5 \leq D < 10$, el índice de erosión es 3; para $10 \leq D < 15$, el índice de erosión es 4; para $D \geq 15$, el índice de erosión es 5 y representa una falla.

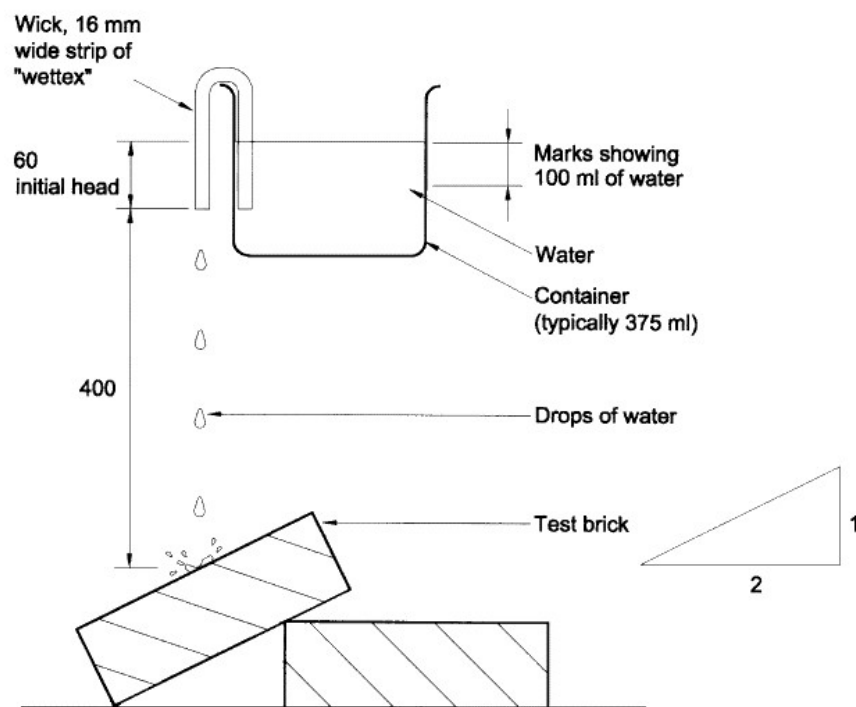


Figura 5. Detalles del ensayo de erosión por goteo (NZS 4298, 1998)

2.3.2 Índice de abrasión

Este índice se obtiene mediante una ligera adaptación del ensayo de abrasión que describe el protocolo de ensayos para la construcción con tierra emitido por la red PROTIERRA (Red Protierra Argentina, 2020). En el ensayo, se hace pasar sobre el revoque de prueba una lija #80 con un peso de 250 g (figura 6). Antes de comenzar, se limpia la superficie con un pincel de cerdas blandas para eliminar material suelto. Se coloca la lija de 25 mm con el peso (perfil T de 200 mm) y se realizan 500 pasadas. Las pasadas se hacen sobre toda la longitud del contrapeso, procurando el contacto de este con el revoque durante toda la ejecución del ensayo. El material desgastado se recoge en un recipiente y se pesa. A su vez se mide la profundidad del surco que dejó el dispositivo de abrasión con un calibre.

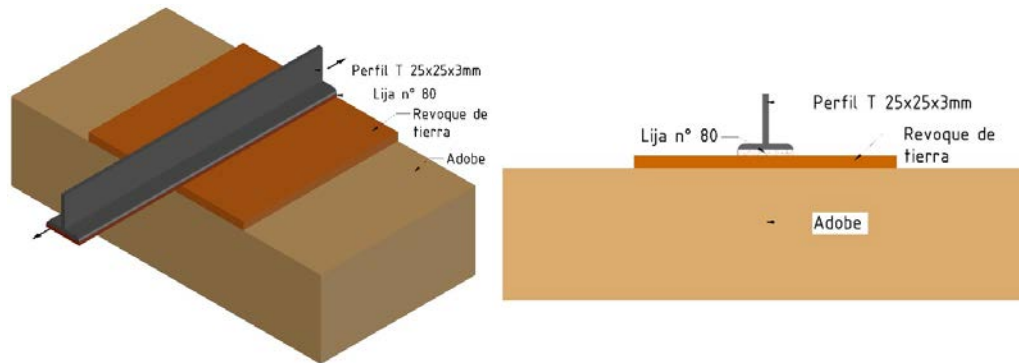


Figura 6. Croquis de ensayo de abrasión adaptado (crédito: A. Rieppi).

Con los datos obtenidos del ensayo, se calcula el coeficiente de abrasión C_a con la fórmula del protocolo (ecuación 1):

$$C_a = \frac{S}{m_{\text{inicial}} - m_{\text{final}}} \quad (1)$$

donde:

C_a es el coeficiente de abrasión (cm^2/g);

S es la superficie lijada (cm^2);

m_{inicial} es la masa inicial de la probeta (g);

m_{final} es la masa final de la probeta (g).

Finalmente, se comparan los resultados con la tabla 5.1 del protocolo de ensayos para la construcción con tierra, en el cual se obtiene el nivel de resistencia a la abrasión según C_a .

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se muestra la tabla 3 con los valores de los parámetros medidos en cada ensayo y con los índices de erosión y abrasión según normas (NZA 4298, 1998; Red Protierra Argentina, 2020).

Se observa que para las muestras de revocos que contienen como base tierra y arena en su composición a medida que aumenta el tiempo de ceramización (y la temperatura final de proceso), aumenta la resistencia a la erosión hídrica. Por ejemplo, para la muestra M1 que no posee aditivos si la misma no fue sometida al tratamiento térmico, la penetración de la gota de agua del ensayo de erosión es de 5,8 mm dando un índice de erosionabilidad de 3; mientras que cuando se lleva a cabo el tratamiento térmico, ya sea a 500°C o 700°C , la impronta que deja la gota de agua es nula y por lo tanto el índice de erosionabilidad es de 1.

La muestra M2 presenta un comportamiento similar al mencionado anteriormente; sin embargo, esta formulación que contiene caolín como aditivo en una cantidad del 25% es menos resistente a la acción de la gota de agua que M1, lo cual se evidencia por los mayores índices de erosionabilidad determinados. Cuando el aditivo empleado es bentonita en una cantidad del 25% (M3), se observa un resultado similar al obtenido para M2, ya que la muestra sin ceramizar y la ceramizada a 500°C se erosionaron por completo. Cabe destacar que la muestra M3 ceramizada durante 10 minutos (temperatura final de 700°C) no presentó degradación por el efecto de la caída de la gota de agua. Al utilizar arcilla de alfarería como aditivo en un 25 % (M4), se obtiene un comportamiento similar a las muestras anteriores, pero en este caso la erosión para la muestra ceramizada durante 5 minutos (temperatura final de 500°C) fue mayor que para el revoque sin ceramizar. Nuevamente se observó que la muestra ceramizada durante 10 minutos (700°C) no presentó signos de erosión.

Los revocos M5-M8 están elaborados a partir de una base de arcilla comercial de alfarería y arena. En estas muestras la arcilla es en su totalidad el material ligante en contraste con los revocos M1-M4 donde el material ligante representa apenas el 20%, es decir, la

fracción arcilla presente en la tierra empleada. El revoque M5 no posee ningún aditivo, y el comportamiento observado en el ensayo de erosión hídrica es similar a la muestra M1 observándose un aumento de la resistencia al agua a medida que aumenta el tiempo de ceramización y por ende la temperatura final del proceso. Para la muestra con una adición de 5 % de ceniza a modo de aditivo, el resultado obtenido fue el mismo. En contraste, para los revoques basados en arcilla y arena que poseen aditivos fundentes industriales como bórax (M7) y el esmalte alcalino (M8), la erosión hídrica fue completa (una impronta de más de 6mm) independientemente de la temperatura de ceramización.

Tabla 3. Resultados de los ensayos erosión hídrica y abrasión

Mezclas	Condición (T) ^a	Erosión hídrica		Abrasión			
		D (mm)	Índice	Profundidad (mm)	Δm (g)	C_a (cm ² /g)	Nivel de resistencia ^d
M1	#1 (---)	5,8	3	2,7	25,2	1,2	4
M1	#2 (500)	0	1	2,1	16,4	1,8	4
M1	#3 (700)	0	1	5	17,5	1,7	4
M2	#1 (---)	5,5	3	4,1	16,3	1,8	4
M2	#2 (500)	5,5	3	(260p) ^c	31	1	4
M2	#3 (700)	2	2	Falló	---	---	---
M3	#1 (---)	--- ^b	---	1,6	11	2,7	3
M3	#2 (500)	--- ^b	---	3,9	21,6	1,4	4
M3	#3 (700)	0	1	5,8	31,7	0,9	4
M4	#1 (---)	3,3	2	2,5	20,2	1,5	4
M4	#2 (500)	4,8	2	4,7	26,4	1,1	4
M4	#3 (700)	0	1	3,8	16	1,9	4
M5	#1 (---)	--- ^b	---	---	31	1	4
M5	#2 (500)	4,5	2	---	22	1,4	4
M5	#3 (700)	0	1	Falló	---	---	---
M6	#1 (---)	--- ^b	---	---	39	0,8	4
M6	#2 (500)	4,5	2	(170p) ^c	---	---	---
M6	#3 (700)	0	1	(110p) ^c	---	---	---
M7	#1 (---)	--- ^b	---	4,3	26	1,2	4
M7	#2 (500)	--- ^b	---	1,5	9	3,3	3
M7	#3 (700)	--- ^b	---	2,3	17	1,8	4
M8	#1 (---)	--- ^b	---	4,4	19	1,6	4
M8	#2 (500)	--- ^b	---	2,3	11	2,7	3
M8	#3 (700)	--- ^b	---	2,7	16	1,9	4

^a Entre paréntesis se indica la temperatura de ceramización en °C.

^b Erosión completa.

^c Entre paréntesis se indica el número de pasadas en el cual el revoque se erosionó por completo.

^d Se determina por: 3 cuando $5 < C_a \leq 2$ y 4 cuando $C_a \leq 2$.

En líneas generales, se observa que a medida que aumenta el tiempo de ceramización, aumenta la resistencia a la erosión hídrica de los revoques. Esta observación pone en evidencia que están ocurriendo cambios en la estructura química superficial de los revoques ya que las fases policristalinas de cerámica son resistentes a la acción del agua. A su vez,

es importante destacar que a partir de los resultados presentados hasta aquí se demuestra que es posible llevar a cabo una ceramización superficial *in situ* sobre una probeta de revoque de tierra, corroborando así la hipótesis inicial de la investigación.

Respecto al comportamiento de los revoques frente al ensayo de abrasión, como se puede observar en la tabla 3 los niveles de resistencia son entre 3 y 4, (valores bajos). Los resultados observados son muy variables y no se observa una tendencia clara como en el caso del ensayo de erosión hídrica. De todas maneras, es importante hacer las siguientes observaciones:

a) El hecho que la resistencia a la abrasión sea muy baja puede deberse en parte a que las mezclas de revoques no poseen un agregado más fino que la arena que se utilizó, el cual otorgaría a las mezclas una mayor compacidad por ende una mayor resistencia mecánica.

b) En la mayoría de las formulaciones se observó que la resistencia a la abrasión disminuyó al realizar el tratamiento térmico, este hecho de debilitamiento mecánico del revoque por acción del calor puede ser explicado, en parte, por las tensiones generadas en el proceso de sinterizado, evidenciándose como contracciones, las cuales ocurren con más intensidad sobre la superficie del revoque que está en contacto con la fuente de calor. Por esta razón, es que se propone en un futuro la incorporación de agregados finos con el fin de reducir al mínimo las tensiones generadas durante el proceso de ceramización superficial.

c) En el caso particular de los revoques M7 y M8, se observó un aumento de la resistencia a la abrasión en los casos donde el tratamiento térmico se realizó durante 5 minutos, llegando a una temperatura de 500°C. Mientras que cuando el proceso de ceramización se extendió a 10 minutos, la mencionada resistencia disminuyó. Si bien es necesario llevar a cabo un estudio más exhaustivo, es posible que esta pérdida de resistencia luego de un tratamiento a mayor temperatura se deba a un mayor grado de sinterizado y contracción de la superficie del revoque.

Como se puede apreciar, el proceso de ceramización superficial *in situ* sobre las probetas de revoques de tierra presentadas en este trabajo produce un aumento de la resistencia a la erosión hídrica y en contraste una disminución de la resistencia a la abrasión de los mismos. No se esperaba observar estos efectos contrapuestos, sin embargo, es una observación muy importante ya que la resistencia mecánica de un revoque de tierra ceramizado debería ser mayor o igual que un revoque de tierra para que pueda ser utilizado con éxito.

4 CONSIDERACIONES FINALES

Los resultados de este trabajo indican que es posible llevar a cabo una ceramización superficial *in situ* sobre una probeta de revoque de tierra. El tratamiento térmico *in situ* sobre las probetas de revoques donde la tierra es el material ligante (M1-M4) produce un aumento de la resistencia a la erosión hídrica y en contraste una disminución de la resistencia a la abrasión de los mismos. Mientras que el mismo proceso térmico en los revoques donde el material ligante fue arcilla comercial (M5-M8) no genera una mejora en la resistencia a la erosión hídrica ya que el revoque sufre una erosión completa. Sin embargo, la resistencia al desgaste mejora notablemente cuando estas probetas se someten al tratamiento descrito durante 5 minutos. En base al desempeño técnico obtenido en estas muestras, se ajustarán las formulaciones buscando aumentar las resistencias a la erosión hídrica y a la abrasión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM D7928 (2017). Standard test method for particle-size distribution (gradation) of fine-grained soils using the sedimentation (hydrometer) analysis. USA: ASTM International.

ASTM D 2487 (2017). Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). USA: ASTM International.

Boch, P.; Nièpce, J.-C. (2007). Ceramics materials. Process, properties and applications. London: ISTE Ltd.

Castilla, F. J. (2011). Revestimientos y acabados superficiales en construcciones con tierra contemporáneas. *Informes de la Construcción*, 63(523), p. 143–152. doi: .10.3989/ic.10.019.

Dirección Nacional de Vialidad (2001) Normas de ensayo, p. 243.

Kebao, R.; Kagi, D. (2012). Integral admixtures and surface treatments for modern earth buildings. *Modern Earth Buildings*. Elsevier, p. 256–281. doi: 10.1533/9780857096166.2.256.

Martin Díaz, N. (2016) *Arquitectura tradicional colombiana como sistema pasivo de aprovechamiento energético*. España: Universidad Politécnica de Valencia.

Minke, G. (2005) *Manual de construcción en tierra: la tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual*. Fin de Siglo.

Minke, G. (2006) *Building with earth design and technology of a sustainable architecture*. Berlin: Birkhäuser – Publishers for Architecture. Available at: <http://www.birkhauser.ch>.

NZS 4298 (1998). *Materials and workmanship for earth buildings*. New Zealand: Standards New Zealand

Pinto, Jorge; Cunha, Sandra; Soares, Nuno; Soares, Edgar; Cunha, Vítor M. C. F.; Ferreira, Débora; Sá, Ana Briga (2017). Earth-based render of tabique walls – an experimental work contribution. *International Journal of Architectural Heritage*, 11(2), p. 185–197. doi: 10.1080/15583058.2015.1020459.

Protocolos de ensayos para materiales de tierra (2020). Red Protierra Argentina Comisión de Materiales, Ensayos y Sistemas Constructivos. Disponible en <http://www.redprotierra.com.ar>

Rotondaro, R.; Mandrini, M. R. (2018). Bloques de tierra comprimida y tapia: dos técnicas con capacidad portante. *Estructuras*, 1(2), pp. 8–17. Available at: <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/estructuras/article/view/24739>.

Santos, T.; Faria, P.; Silva, A. S. (2017). Avaliação *in situ* do comportamento de rebocos exteriores de argamassas de terra com baixas adições de cais. *Conservar Património*, (26), p. 11–21. doi: 10.14568/cp2016022.

Zuleta Roa, G. (2012). La arquitectura en tierra: una alternativa para la construcción sostenible'. *Hábitat Sustentable*, 1(1), p. 35–39. Available at: <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/v1n1>.

AUTORES

Araí S. Rieppi Godoy, ingeniera civil, becaria doctoral de CONICET, estudiante del doctorado en ingeniería mención materiales en UTN-FRC, lugar de trabajo Centro Experimental de la Vivienda Económica CEVE-CONICET-AVE.

Lucas E. Peisino, doctor en ciencias químicas por la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Investigador asistente de CONICET. Integrante del grupo de nuevos materiales del Centro Experimental de la Vivienda Económica (CEVE) y la Asociación de Vivienda Económica. Miembro de la red argentina PROTIERRA.

Rosana Gaggino, doctora en ciencias del diseño (egresada de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Nacional de Córdoba), magister en diseño arquitectónico y urbano (misma Facultad), arquitecta y urbanista (misma Facultad). Investigadora independiente de CONICET. Directora del Centro Experimental de la Vivienda Económica CEVE-CONICET-AVE, su lugar de trabajo.

Guillermo Rolón, doctor por la Universidad de Buenos Aires con especialidad en arqueología, master en restauración y gestión integral del patrimonio construido, arquitecto. Investigador adjunto del CONICET e investigador adscripto del CRIATiC. Integrante del programa de extensión universitaria MHaPa (Mejoramiento del Hábitat participativo), miembro de la Red Iberoamericana PROTERRA, miembro de la red argentina PROTIERRA.

Bárbara Belén Raggiotti, doctora en ingeniería, mención materiales (UTN), ingeniera civil (UTN). Docente investigadora CINTEMAC – UTN, FRC. Profesora adjunta en las cátedras Estructura del hormigón y Tecnología del hormigón de la Facultad Regional Córdoba, UTN. Miembro del Comité Editorial de la Revista Hormigón (AATH). Miembro del Sub-Comité Hormigones y sus Aplicaciones (IRAM)